

## MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DEL EMBALSE DE SALTO GRANDE

Rafael Rodríguez Núñez, Santiago Delgado Torres y Pablo Santoro Rodríguez

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República – Uruguay  
Ave Julio Herrera y Reissig 565, 11300 Montevideo, Departamento de Montevideo. Teléfono: (+598) 2714 2714  
[rrodriguez@fing.edu.uy](mailto:rrodriguez@fing.edu.uy), [sdelgado@fing.edu.uy](mailto:sdelgado@fing.edu.uy), [psantoro@fing.edu.uy](mailto:psantoro@fing.edu.uy)

### Introducción

Los embalses para generación hidroeléctrica son cuerpos de agua semilénticos que además de la generación de energía, tienen otros usos como por ejemplo, potabilización, pesca y recreación. El incremento del tiempo de residencia del agua en los embalses combinado con el creciente proceso de eutrofización de estos favorece la ocurrencia de floraciones fitoplanctónicas. Estos eventos tienen consecuencias negativas sobre el ecosistema (afectando sus propiedades físico-químicas y la biota del cuerpo de agua), e interfieren con las actividades antrópicas mencionadas. En este trabajo se busca profundizar y contribuir a una mejor gestión de la calidad de agua de los embalses de generación hidroeléctrica generando herramientas tecnológicas (modelos numéricos) que ayuden a comprender la dinámica del sistema y permitan pronosticar su comportamiento futuro.

El objetivo de este trabajo es implementar un modelo hidrodinámico y de transporte de sustancias para uno de los cuatro embalses de generación hidroeléctrica del Uruguay, el caso de estudio es el embalse de Salto Grande. Dicho modelo será utilizado para realizar una caracterización de la hidrodinámica en el embalse y así como de sus escalas temporales de transporte.

### Área de estudio

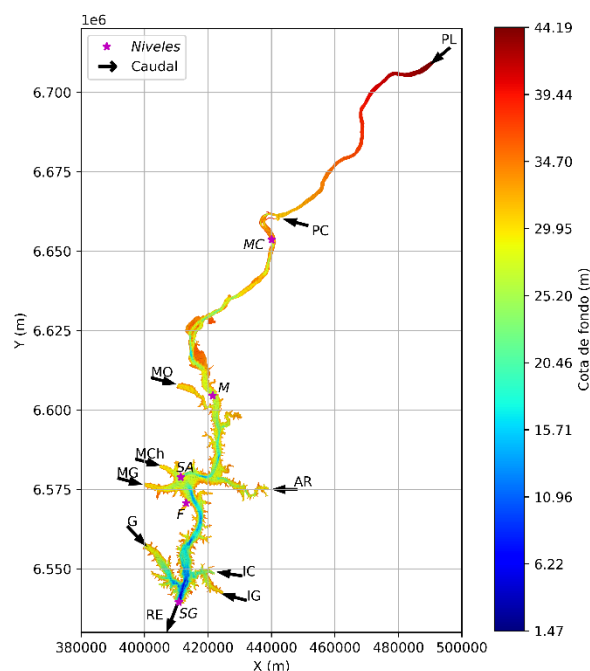
El Complejo Hidroeléctrico Salto Grande (CHSG) se encuentra ubicado en el curso medio del río Uruguay (31°16'28.7"S, 57°56'21.0"W, kilómetro 342,6), aguas arriba de las ciudades de Concordia (Argentina) y Salto (Uruguay). La cuenca del río Uruguay hasta el CHSG abarca una extensión aproximada de 244.000 km<sup>2</sup>, esta cuenca puede dividirse en tres grandes áreas, para analizar los distintos aportes al embalse. La cuenca inmediata se encuentra comprendida entre la ciudad de Paso de los Libres y la represa de Salto Grande y abarca un área aproximada de 47.200 km<sup>2</sup>. El embalse de Salto Grande se encuentra ubicado en dicha cuenca y es un lago artificial de múltiples propósitos, entre ellos, producción de energía, agua potable y actividades recreativas. La morfología del reservorio es de tipo dendrítica, compuesta por una única entrada principal, río Uruguay, y múltiples brazos laterales, de los cuales los más relevantes en términos de aportes de caudal son el río Arapey y el río Mocoreta. En las últimas tres décadas múltiples trabajos científicos abordan el fenómeno de floraciones de fitoplancton en el embalse de Salto Grande dando cuenta de los problemas de calidad de agua en este cuerpo de agua (Berón, 1990; Quirós & Luchini, 2005; O'Farrell et al., 2012; Bordet et al., 2017; Drozd et al., 2020).

### Metodología

Se utilizó el modelo numérico TELEMACE-MASCARET ([www.opentelemac.org](http://www.opentelemac.org)), en particular su módulo hidrodinámico bidimensional TELEMACE 2D (Hervouet, 2007). Este resuelve las ecuaciones diferenciales para el flujo de fluidos a superficie libre promediado en la profundidad (ecuaciones de Barre de Saint-Venant). El modelo utiliza un método de elementos finitos o volúmenes finitos y una malla de cálculo no estructurada de elementos triangulares.

El dominio computacional (Figura 1) incluye el embalse de Salto

Grande y un tramo fluvial de su principal tributario. Algunas islas en el reservorio fueron incluidas como superficie terrestre mientras que las más cercanas al tramo fluvial fueron excluidas del dominio. La malla de cálculo consiste en aproximadamente 28.000 nodos y 49.500 elementos de dimensiones 250 m y zonas de refinamiento en brazos y represa con tamaños de elemento de 125 m. La batimetría fue suministrada por la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande (CTM-SG), para la zona comprendida entre la represa y Paso de la Cruz, la misma fue interpolada a la grilla de cálculo mediante el método del inverso de la distancia al cuadrado. Para el tramo comprendido entre Paso de la Cruz y Paso de los Libres se procedió a extender la pendiente del último tramo de la batimetría interpolada a la grilla.



**Figura 1.-** Batimetría del modelo, esquema de distribución de caudales y estaciones de nivel. El flujo AR corresponde a la suma de AG y AC.

Los flujos de entrada en base horaria se dividieron en dos categorías: flujos de entrada medidos y flujos de entrada no medidos. Los flujos medidos fueron suministrados por CTM-SG para las estaciones Paso de los Libres (PL), Paso de la Cruz (PC), Arapey grande (AG), Arapey chico (AC) y Represa (RE). Por otro lado, se tienen flujos de entrada no medidos correspondientes a las estaciones: Itapébi grande (IG), Itapébi chico (IC), Mocoreta (MO), Mandisovi chico (MCh), Mandisovi grande (MG) y Gualaguaycito (G). Los caudales no medidos surgen de ajustar la diferencia entre el caudal de aporte hidrológico (balance de masa realizado por CTM-SG) y la suma de los flujos de entrada medidos, proporcional al área de aporte de cada brazo. Los datos de viento se obtuvieron del producto de reanálisis ERA5 del ECMWF. Asimismo, se disponen de 6 estaciones de medición de niveles: Monte Caseros (MC), Mocoreta (MO), Federación (F), Santa Ana (SA), Salto Grande (SG) y Represa (RE).

El modelo fue forzado por los flujos de entrada y salida, así como la tensión del viento en la superficie. Las condiciones de borde

en las fronteras abiertas fueron nivel y caudal erogado en la Represa utilizando una condición de borde tipo Thompson (Hervouet, 2007), y caudal de entrada en las otras fronteras abiertas. En el fondo se asumió la ley de fricción de Manning.

Se simularon los periodos 2017 – 2018 y 2019 – 2020, la condición inicial de la elevación de la superficie libre y el campo de velocidades viene dado por un estado estacionario con nivel 32,35 m en la represa y caudal de ingreso constante en el borde líquido de Paso de los Libres de 3391 m<sup>3</sup>/s. El paso de tiempo del modelo se establece en una constante de 5,0 s. La rugosidad de fondo y coeficiente de arrastre por el viento serán los parámetros hidrodinámicos de calibración del modelo.

## Resultados

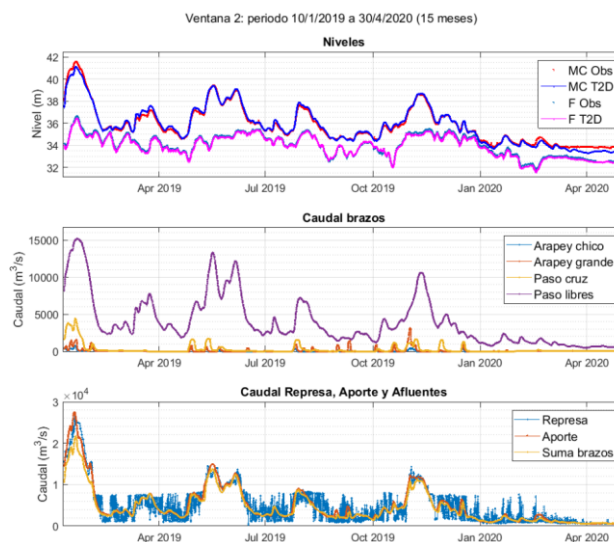
El modelo se calibró para el nivel de agua en la estación Monte Caseros (MC), Mocoreta (M), Santa Ana (SA), Federación (F) y Salto Grande (SG), para el periodo del 10 de enero de 2019 hasta el 30 de abril de 2020 (15 meses aprox., periodo denominado ventana 2). Se observa que luego de algunas horas la condición inicial deja de ser relevante. Los parámetros calibrados incluyen el coeficiente de rugosidad de Manning ( $n$ ) para el cual se consideran los valores 0.020, 0.024, 0.025, 0.026 y 0.030, y por otro lado el coeficiente de arrastre del viento ( $C_D$ ) para el cual se consideran valores constantes iguales a  $1.0 \times 10^{-3}$ ,  $1.25 \times 10^{-3}$ ,  $1.5 \times 10^{-3}$ , y  $2.0 \times 10^{-3}$ . Los parámetros relacionados con el modelo de cierre de turbulencia se consideran constantes. El error medio absoluto (MAE), el error cuadrático medio (RMSE) y el sesgo (BIAS) se utilizan para evaluar el error de predicción. El modelo se validó para el nivel del agua en la estación MC, M, F, SA, y SG, para dos ventanas temporales: del 28 de febrero de 2018 hasta el 20 de julio de 2018 (5 meses aprox., periodo denominado ventana 1), y del 27 de mayo de 2020 hasta el 21 de octubre de 2020 (5 meses aprox., periodo denominado ventana 3).

Para el periodo de calibración los resultados obtenidos indican que el modelo es poco sensible al coeficiente de rugosidad de Manning para las estaciones afectadas por el embalse, es decir, SG, F, y SA, donde las diferencias entre el RMSE y MAE son del orden del milímetro al centímetro. Las estaciones M y MC con un comportamiento más bien transicional y fluvial, respectivamente, presentan una mayor sensibilidad, en este caso las diferencias entre RMSE y MAE son del orden del centímetro al decímetro. Respecto al coeficiente de arrastre de viento, el modelo presenta poca sensibilidad para todas las estaciones en el periodo de calibración, con variaciones entre simulaciones del orden del milímetro.

De forma cualitativa, para  $n = 0.025$  y  $C_D = 1.0 \times 10^{-3}$ , la Figura 2 presenta los resultados obtenidos para la estación F y MC para el periodo de calibración, en conjunto con los flujos de entrada medidos, mientras que la Tabla 1 presenta cuantitativamente los resultados de la evaluación de las predicciones para las tres ventanas temporales.

**Tabla 1.-** Evaluación de las predicciones de las estaciones F y MC para calibración (Ventana 2) y validación (Ventana 1 y 3).

Estación F	Ventana 1	Ventana 2	Ventana 3
RMSE (m)	0,1157	0.1384	0.1223
MAE (m)	0,1013	0.1267	0.1183
BIAS (m)	-0,0988	-0,1082	-0,1183
Estación MC	Ventana 1	Ventana 2	Ventana 3
RMSE (m)	0,1494	0.2230	0,2900
MAE (m)	0,1159	0.1748	0,2625
BIAS (m)	0,0387	-0,0073	0,2541



**Figura 2.-** Niveles observados y modelados (T2D) para estación F y MC, y flujos de entrada medidos. Periodo de calibración (Ventana 2).

## Conclusiones

En base a la información disponible fue posible implementar un modelo hidrodinámico para el embalse de Salto Grande. El modelo es capaz de reproducir adecuadamente los niveles en varias estaciones en distintas zonas del embalse.

Sobre la base del modelo hidrodinámico se está realizando un análisis de patrones de circulación y estimación de parámetros hidrodinámicos de tiempo siguiendo metodologías basadas en la simulación del transporte de sustancias pasivas en embalse (Deleersnijder et al., 2001; Jouon et al., 2006).

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto de investigación ANII-FMV 2019 “Herramientas numéricas de apoyo a la gestión de calidad de agua en embalses para generación hidroeléctrica”.

## Referencias

- Berón, Laura E.** (1990). Features of the limnological behavior of Salto Grande's reservoir (Argentina-Uruguay). *Ecological Modelling*, 52, 87-102.
- Bordet, F., Fontanarrosa, MS., O'Farrell, I.** (2017). Influence of light and mixing regime on bloom-forming phytoplankton in a subtropical reservoir. *River Research and Applications*, 33 (8), 1315-1326.
- Deleersnijder, É., Campin, J.M., & Delhez, É.J.** (2001). The concept of age in marine modelling I. Theory and preliminary model results. *Journal of Marine Systems*, 28, 229-267.
- Drozd, A., de Tezanos Pinto, P., Cañal Fernández, V., Bazzalo, M., Bordet, F., Ibáñez, G.** (2020). Hyperspectral remote sensing monitoring of cyanobacteria blooms in a large South American reservoir: high- and medium-spatial resolution satellite algorithm simulation. *Marine and Freshwater Research*, 71, 593-605.
- Hervouet, J.-M.** (2007). *Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling with the finite element method*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Jouon, A., Douillet, P., Ouillon, S., & Fraunié, P.** (2006). Calculations of hydrodynamic time parameters in a semi-opened coastal zone using a 3D hydrodynamic model. *Continental Shelf Research*, 26, 1395-1415.
- O'Farrell, I., Bordet, F. & Chaparro, G.** (2012). Bloom forming cyanobacterial complexes cooccurring in a subtropical large reservoir: validation of dominant eco-strategies. *Hydrobiologia* 698 (1), 175-190.
- Quirós, R., & Luchini, L.** (2005). Características Limnológicas del Embalse de Salto Grande, III: Fitoplancton y su Relación con Parámetros Ambientales. *Natura Neotropicalis*, 1(13), 49-66.